

ВАСИЛЕЦЬ СВЯТОСЛАВ

Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне

<https://orcid.org/0000-0003-1299-8026>e-mail: s.vasylets@nuwm.edu.ua**ВАСИЛЕЦЬ КАТЕРИНА**

Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне

<https://orcid.org/0000-0002-7590-0754>e-mail: k.s.vasylets@nuwm.edu.ua**ІЛЬЧУК ВОЛОДИМИР**

Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне

<https://orcid.org/0000-0001-9682-6066>e-mail: v.v.ilchuk@nuwm.edu.ua**ОЦІНЮВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ПРИ ЗНИЖЕНОМУ СТРУМІ ЧЕРЕЗ ВУЗОЛ ОБЛІКУ**

Обґрунтовано математичну модель для оцінювання невизначеності вимірювання електроенергії при зниженому струмі через вузол обліку. Встановлено, що на точність обліку трифазним лічильником трансформаторного ввімкнення впливають характеристики кожного з вимірювальних каналів, що відповідають фазам. Запропоновано для оцінювання невизначеності вимірювання електроенергії використовувати нечітку функцію, аргументами якої є фазні струми споживача. Реалізація моделі у вигляді комп'ютерної програми дозволяє удосконалити програмне забезпечення смарт лічильників електроенергії.

Ключові слова: електроенергія, лічильник, вимірювання, невизначеність, трансформатор струму, споживач, вузол обліку.

VASYLETS SVIATOSLAV, VASYLETS KATERYNA, ILCHUK VOLODYMYR

National University of Water and Environmental Engineering, Rivne

EVALUATION OF ELECTRICITY MEASUREMENT UNCERTAINTY AT REDUCED CURRENT THROUGH THE METERING UNIT

The object of the study is the process of electricity measurement by a three-phase metering unit, which includes an electricity meter and measuring current transformers in 0.38 kV distribution networks. The subject of the study is the uncertainty of electricity measurement at a reduced current through the metering unit. The aim of the research is to increase the accuracy of electricity measurement by a smart meter due to the development of a mathematical model for estimating the uncertainty of measurement at reduced current through the metering unit. During the research, the theory of fuzzy sets, methods of polynomial approximation, in particular, the method of least squares, the method of minimizing the Chebyshev norm of the discrepancy were used. As a result of the study, a mathematical model was obtained for estimating the uncertainty of electricity measurement by the metering unit in the reduced load mode using a fuzzy function. The model differs from the known ones by taking into account the influence of the values of asymmetric currents of the load phases at the boundaries of the fuzzy interval at the limit level of confidence that characterizes the measurement result. A method of calculating the parameters of the fuzzy function and the limit level of confidence for the metering unit of a specific configuration has been developed, which involves evaluating the deviations of the readings of the transformer connection meter from the readings of the additional direct connection meter. The model is implemented as a computer program. Based on the current meter readings, which are read automatically, the largest amount of underaccounting is calculated. This makes it possible to provide the consumer with recommendations on the modernization of the metering unit equipment, in particular, the replacement of current transformers, in order to bring their transformation ratio into compliance with the actual load currents and, accordingly, work in the normalized range.

Keywords: electricity, meter, measurement, uncertainty, current transformer, consumer, metering unit.

Постановка проблеми

Для комерційного обліку електроенергії використовуються вузли обліку, вимоги до засобів вимірювальної техніки яких встановлені Кодексом комерційного обліку електричної енергії. До складу типового вузла обліку для розподільчих електромережах напругою 0,38 кВ входять лічильник РІ та вимірювальні трансформатори струму ТА1–ТА3, рис. 1. Якщо приєднана потужність навантаження не перевищує 160 кВА, клас точності лічильника не має бути нижчим від 2,0, а трансформаторів струму – від 0,5 S [1]. Для трансформаторів струму класів точності 0,2 S та 0,5 S нормування струмової похибки здійснюється від 1% номінального значення струму, при якому струмова похибка не перевищує 1,5%. Лічильники електроенергії на мікропроцесорній елементній базі (смарт лічильники), окрім обліку електроенергії та передачі вимірювальної інформації, забезпечують керування навантаженням. Впровадження таких пристроїв у вітчизняних електромережах передбачена Концепцією [2]. Глобальний ринок розумних лічильників електроенергії у 2020 році становив 10,4 млрд. доларів США, за 2024 рік його обсяг очікується на рівні 13,5 млрд доларів США [3].

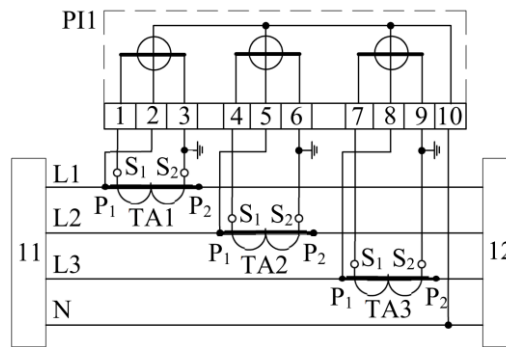


Рис. 1. Схема вузла обліку електроенергії напругою 0,38 кВ: 1–10 – клеми трифазного лічильника; 11 – джерело живлення; 12 – споживач

Зниження струму через вузол обліку електроенергії промислового підприємства може мати місце під час простоїв обладнання, зокрема – в нічний час. Також такий режим можливий за наявності сонячної електростанції при приблизній тотожності потужностей генерації та споживання. Зниження струму через вимірювальні трансформатори підвищує величину їх струмової похибки. Окрім того, збільшується похибка лічильника, оскільки струм через його вимірювальні кола може бути меншим від нижньої межі нормованого діапазону вимірювання. Такі процеси спостерігалися для одного з промислових споживачів м. Рівне, вузол обліку якого був розрахований на значно більший струм (трансформатори струму 200/5 класу точності 0,5 S), ніж той, що фактично споживається. Встановлено, що фактичні струми є меншими 1% приблизно в половині випадків, рис. 2. При цьому рівень недообліку електроенергії може досягати 80% [4]. Аналогічні результати одержані в [5], де похибка вузла обліку при низькому первинному струмі оцінюється інтервалом від –30% до –90%.

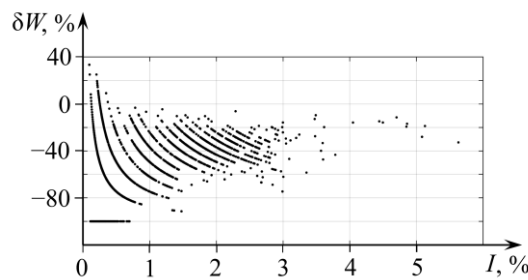


Рис. 2. Експериментальні величини похибок обліку електроенергії δW , %, залежно від струму вузла обліку I , %, для приватного промислового підприємства у м. Рівне

Виходячи з цього, актуальною видається проблема підвищення точності обліку електроенергії. Однією з задач, що мають бути розв'язані для вирішення проблеми, є оцінювання невизначеності вимірювання електроенергії при зниженому струмі через вузол обліку. Розроблення математичної моделі, яка дозволяє оцінити рівень недообліку, в режимі зниженого первинного струму, дасть змогу удосконалити програмне забезпечення смарт лічильників електроенергії.

Аналіз останніх джерел

Невизначеність вимірювання залежить, окрім величини струму, також від його гармонійного складу та збурень зовнішнього середовища. Наявність вищих гармонік може призвести до похибок трансформатора струму, які за оцінками [6] не перевищують $\pm 1,5\%$, а відповідно до результатів дослідження [7] можуть досягати 3,4%. Для зниження похибок вимірювальних трансформаторів струму в роботі [8] запропоновано конструкцію трансформатора з двома осердями, функціонування яких базується на ефекті тунельного магнітоопору. Характеристики прототипу в області низьких струмів відповідають трансформатору класу точності 0,2 S. Однак, у складі електромережі експлуатується велика кількість електромагнітних трансформаторів струму класичної конструкції, точність функціонування яких доцільно підвищити. Для компенсації впливу зовнішнього середовища на вузол обліку (температура, вологість, магнітні поля тощо) у роботі [9] пропонується виконувати корекцію показів лічильника за допомогою нейронної мережі на основі довгої короткочасної пам'яті. Однак, такий підхід не передбачає врахування похибок від зниженого струму навантаження.

Для підвищення точності функціонування передової вимірювальної інфраструктури (Advanced Metering Infrastructure) у складі низьковольтної розподільчої мережі запропоновано використання рекурсивного перетворення Кархунена–Лоєва під час обміну інформації в багаторівневій розумній мережі [10]. Також штучну нейронну мережу пропонується використовувати для компенсації похибок вимірювальних трансформаторів струму [11]. До недоліків таких підходів відноситься складність технічної реалізації.

Для синусоїдних струмів та напруг в роботі [12] було встановлено, що величини невизначеностей вимірювання двонаправленого лічильника електроенергії не залежать від напрямку потужності. Це дає підстави розповсюдити результати дослідження невизначеності вимірювання енергії додатного напрямку (від джерела до споживача) на енергію протилежного напрямку.

Таким чином, існуючі рішення з підвищення точності обліку електроенергії не приділяють достатньо уваги функціонуванню вузла обліку при зниженому струмі навантаження. В той же час такий режим може мати місце в разі зменшення енергоспоживання (через зміни технологічного процесу, впровадження заходів з енергозбереження, використання відновлювальних джерел, в нічні перерви між робочими змінами промислового підприємства тощо) за відсутності модернізації вузла обліку. Це визначає необхідність дослідження точності обліку електроенергії під час вказаних режимів.

Метою роботи є підвищення точності вимірювання електроенергії смарт лічильником за рахунок розроблення математичної моделі для оцінювання невизначеності вимірювання при зниженому струмі через вузол обліку.

Виклад основного матеріалу

Позначимо первинний та вторинний струми вимірювального трансформатора $I_\zeta(t)$ та $I_{S\zeta}(t)$, відповідно, при $\zeta = \{L1, L2, L3\}$, тоді його статична характеристика має вигляд:

$$I_{S\zeta} = I_{S\zeta}(I_\zeta). \quad (1)$$

Трифазний смарт лічильник електроенергії РІ1, що приєднаний за допомогою трансформаторів струму, може бути поданий сукупністю трьох незалежних вимірювальних каналів, статична функція перетворення кожного з яких дорівнює [13]:

$$W_{PI1,\zeta} = W_{PI1,\zeta}[t, I_{S\zeta}[I_\zeta(t)], U_\zeta(t), \cos \varphi_\zeta(t)] = \int_0^t I_{S\zeta}(t) \cdot U_\zeta(t) \cdot \cos \varphi_\zeta(t) dt. \quad (2)$$

Прийmemo наступні припущення: під «зниженим струмом через вузол обліку» розуміється змінний струм, діюча величина якого знаходиться в діапазоні від нуля до подвоєного мінімального первинного струму вимірювального трансформатора струму, для якого ДСТУ EN 61869-2:2017 нормує відносну похибку; струми споживача $I_\zeta(t)$ є реалізаціями випадкового стаціонарного процесу; протягом інтервалу $\Delta t = t_2 - t_1$ діючі значення струмів фаз лишаються незмінними; фазні напруги $U_\zeta(t)$ мережі розглядаються як збурення, що відповідають реалізаціям випадкового стаціонарного процесу, причому $P[0,9 \leq U_\zeta^*(t) \leq 1,1] \approx 0,95$, тобто вважається, що коливання напруги живлення знаходяться у допустимих, відповідно до ДСТУ EN 50160:2014, межах; коефіцієнти потужності $\cos \varphi_\zeta(t)$ фаз навантаження дорівнюють одиниці, що обґрунтовується активним характером навантаження (освітлення, сигналізація тощо) промислового підприємства під час простоїв технологічного устаткування; розглядається випадок додатного напрямку потужності: від джерела до навантаження.

Враховуючи обґрунтовані припущення, статична функція перетворення вимірювального каналу становить:

$$W_{PI1,\zeta} = W_{PI1,\zeta}(t, I_\zeta). \quad (3)$$

Нехай знижений струм протікає через вузол обліку протягом часу Δt , тоді облікована для кожного з каналів активна енергія дорівнює:

$$W_{PI1,\zeta}(\Delta t, I_\zeta) = W_{PI1,\zeta}(t_2, I_\zeta) - W_{PI1,\zeta}(t_1, I_\zeta). \quad (4)$$

Для визначення активної енергії, що облікована кожним з вимірювальних каналів, скористаємося методом суперпозиції, відповідно до якого проаналізуємо функціонування кожного каналу окремо. Для ζ -го каналу статична функція перетворення для моментів часу $t_{1(2)}$ дорівнює:

$$W_{PI1,\zeta}(t_{1(2)}, I_\zeta) = k_{TA\zeta}(I_\zeta) \cdot W_{PI1,\zeta,mr}(t_{1(2)}), \quad (5)$$

причому $W_{PI1,\zeta,mr}(t_{1(2)})$ – покази лічильника РІ1 в моменти часу $t_{1(2)}$; $k_{TA\zeta}(I_\zeta) = I_\zeta / I_{S\zeta}(I_\zeta)$ – коефіцієнт трансформації вимірювального трансформатора струму TA_ζ у складі вузла обліку.

З урахуванням (5) можна обчислити активну енергію, яка облікована за одним з каналів:

$$W_{PI1,\zeta}(\Delta t, I_\zeta) = k_{TA\zeta}(I_\zeta) \cdot [W_{PI1,\zeta,mr}(t_2) - W_{PI1,\zeta,mr}(t_1)]. \quad (6)$$

Енергія, що виміряна трифазним лічильником трансформаторного підключення, становить:

$$W_{PI1}(\Delta t, I_A, I_B, I_C) = \sum_{\zeta=\{A,B,C\}} W_{PI1,\zeta}[\Delta t, I_{S\zeta}(I_\zeta)]. \quad (7)$$

Для того, щоб оцінити невизначеність вимірювання, передбачається використовувати додатковий лічильник РІ2 прямого підключення. Такий пристрій підключається послідовно з вузлом обліку, але, на відміну від лічильника РІ1 трансформаторного підключення, працює в межах власного класу точності. Тоді можна оцінити точність вимірювання за каналом кожної з фаз за абсолютним та відносним відхиленнями:

$$\Delta W_\zeta(\Delta t, I_\zeta) = W_{PI1,\zeta}(\Delta t, I_\zeta) - W_{PI2,\zeta}(\Delta t, I_\zeta), \quad (8)$$

$$\delta W_\zeta(\Delta t, I_\zeta) = \frac{\Delta W_\zeta(\Delta t, I_\zeta)}{W_{PI2,\zeta}(\Delta t, I_\zeta)} = \frac{W_{PI1,\zeta}(\Delta t, I_\zeta) - W_{PI2,\zeta}(\Delta t, I_\zeta)}{W_{PI2,\zeta}(\Delta t, I_\zeta)} = \frac{W_{PI1,\zeta}(\Delta t, I_\zeta)}{W_{PI2,\zeta}(\Delta t, I_\zeta)} - 1. \quad (9)$$

Враховуючи в останньому виразі залежність (6), маємо:

$$\delta W_\zeta(I_\zeta) = \frac{I_\zeta}{I_{S\zeta}(I_\zeta)} \cdot \frac{W_{PI1,\zeta,mr}(t_2) - W_{PI1,\zeta,mr}(t_1)}{W_{PI2,\zeta,mr}(t_2) - W_{PI2,\zeta,mr}(t_1)} - 1. \quad (10)$$

Оскільки вимірювальні канали є незалежними, то загальне відхилення показів по трьом фазам становить:

$$\delta W(I_A, I_B, I_C) = \frac{\sum_{\zeta=\{L1,L2,L3\}} \Delta W_\zeta(\Delta t, I_\zeta)}{\sum_{\zeta=\{L1,L2,L3\}} W_{PI2,\zeta}(\Delta t, I_\zeta)}. \quad (11)$$

Враховуючи у виразі (11) залежність (9), маємо:

$$\delta W(I_{L1}, I_{L2}, I_{L3}) = \frac{\delta W_{L1}(I_{L1})}{1 + \frac{W_{PI2.L2}(\Delta t, I_{L2})}{W_{PI2.L1}(\Delta t, I_{L1})} + \frac{W_{PI2.L3}(\Delta t, I_{L3})}{W_{PI2.L1}(\Delta t, I_{L1})}} + \frac{\delta W_{L2}(I_{L2})}{1 + \frac{W_{PI2.L1}(\Delta t, I_{L1})}{W_{PI2.L2}(\Delta t, I_{L2})} + \frac{W_{PI2.L3}(\Delta t, I_{L3})}{W_{PI2.L2}(\Delta t, I_{L2})}} + \frac{\delta W_{L3}(I_{L3})}{1 + \frac{W_{PI2.L1}(\Delta t, I_{L1})}{W_{PI2.L3}(\Delta t, I_{L3})} + \frac{W_{PI2.L2}(\Delta t, I_{L2})}{W_{PI2.L3}(\Delta t, I_{L3})}} \quad (12)$$

У знаменниках останнього виразу зустрічаються відношення:

$$\frac{W_{PI2.\zeta}(\Delta t, I_\zeta)}{W_{PI2.\eta}(\Delta t, I_\eta)} = \frac{\int_t^{t+\Delta t} I_\zeta dt}{\int_t^{t+\Delta t} I_\eta dt} = \frac{I_\zeta \cdot \Delta t}{I_\eta \cdot \Delta t} = \frac{I_\zeta}{I_\eta} \quad (13)$$

де $\eta = \{L1, L2, L3\}$, $\zeta \neq \eta$.

Беручи до уваги (13), з (12) одержуємо:

$$\delta W(I_{L1}, I_{L2}, I_{L3}) = \frac{I_{L1} \cdot \delta W_{L1}(I_{L1}) + I_{L2} \cdot \delta W_{L2}(I_{L2}) + I_{L3} \cdot \delta W_{L3}(I_{L3})}{I_{L1} + I_{L2} + I_{L3}} = \frac{\sum_\zeta I_\zeta \cdot \delta W_\zeta(I_\zeta)}{\sum_\zeta I_\zeta} \quad (14)$$

Із залежності (14) можна встановити, що відносні відхилення енергій за кожним з каналів, середньозважені за струмами фаз, визначають відносну похибку вузла обліку.

Будемо розглядати величину (14) як нечітку, що при рівні довіри λ_j^* , за умови знаходження струму на $\gamma = \overline{1, M}$ дискретному рівні, обмежена інтервалом:

$$\delta \widetilde{W}_{\zeta\gamma} = \left[\delta W_{L\zeta\gamma} |_{\lambda_j^*}; \delta W_{R\zeta\gamma} |_{\lambda_j^*} \right], \quad (15)$$

де $\lambda_j^* > \lambda_{j+1}^*$, при $j = \overline{1, \Lambda}$.

Припустимо, що для кожного з рівнів довіри виконується апроксимація меж нечітких інтервалів (15) за всіма дискретними рівнями струму. В результаті одержуємо нечітку функцію для кожного з каналів (рис. 3):

$$\delta \widetilde{W}_\zeta(I_\zeta) = \left[\delta W_{L\zeta}(I_\zeta) |_{\lambda_j^*}; \delta W_{R\zeta}(I_\zeta) |_{\lambda_j^*} \right], \quad (16)$$

причому

$$\delta W_{L\zeta}(I_\zeta) |_{\lambda_j^*} = F[I_\zeta, \{L_{\zeta j}\}]; \delta W_{R\zeta}(I_\zeta) |_{\lambda_j^*} = F[I_\zeta, \{R_{\zeta j}\}], \quad (17)$$

де $\{L_{\zeta j}\}, \{R_{\zeta j}\}$ – множини параметрів апроксимуючої функції F для, відповідно, лівої та правої меж (16).

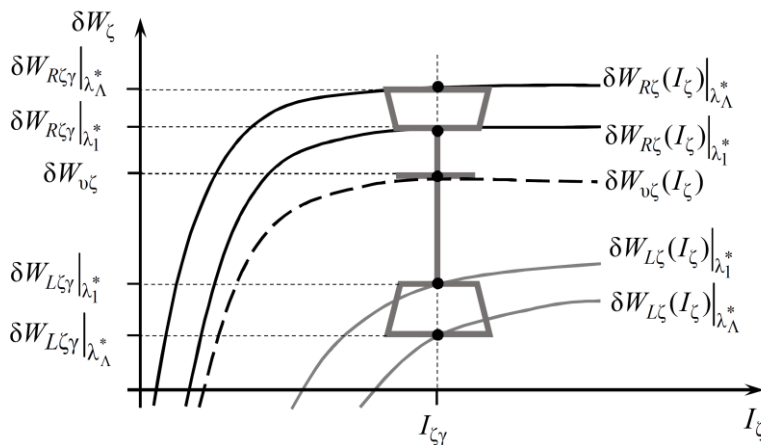


Рис. 3. Залежність невизначеності вимірювання електроенергії, що оцінюється нечіткою функцією, за ζ каналом вузла обліку від величини струму відповідної фази

Враховуючи у (14) нечітку функцію (16), одержимо фаззі-функцію, яка дозволяє оцінити невизначеність вимірювання електроенергії для трифазного лічильника трансформаторного ввімкнення у складі вузла обліку:

$$\delta \widetilde{W}(I_{L1}, I_{L2}, I_{L3}) = \frac{\sum_\zeta I_\zeta \cdot \delta \widetilde{W}_\zeta(I_\zeta)}{\sum_\zeta I_\zeta}, \quad (18)$$

причому межі такої нечіткої функції для визначеного рівня довіри λ_j^* становлять:

$$\delta W_{L(R)}(I_{L1}, I_{L2}, I_{L3}) |_{\lambda_j^*} = \frac{\sum_\zeta I_\zeta \cdot \delta W_{L(R)\zeta}(I_\zeta) |_{\lambda_j^*}}{\sum_\zeta I_\zeta}. \quad (19)$$

На основі аналізу експериментальних даних для конкретних величини струмів фаз за визначеними, для множини рівнів довіри, межами (19) можливо побудувати функцію приналежності μ_{abc} для нечіткої функції $\delta W(I_{L1}, I_{L2}, I_{L3})$. Гілки такої функції будуються шляхом апроксимації експериментальних точок (з використанням методу найменших квадратів або методу мінімізації чебишевської норми нев'язки, рис. 4):

$$\mu_{abc}(\delta W) = \begin{cases} \mu_{abcL}(\delta W), & \text{при } \delta W \leq \delta W_v; \\ \mu_{abcR}(\delta W), & \text{при } \delta W > \delta W_v. \end{cases} \quad (20)$$

Для оцінювання рівня недообліку для конкретного вимірювального обладнання передбачається на основі кожного дослід з двома лічильниками визначити за функцією приналежності μ_{abc} вибіркоче значення λ_e^* рівня довіри за емпіричною величиною δW_e , рис. 4. Якщо гіпотеза про нормальний розподіл λ_e^* не відкидається за прийнятого рівня значущості, то на їх основі можливо оцінити граничне значення рівня довіри:

$$\lambda_b^* = m[\lambda_e^*] - 2s[\lambda_e^*]. \quad (21)$$

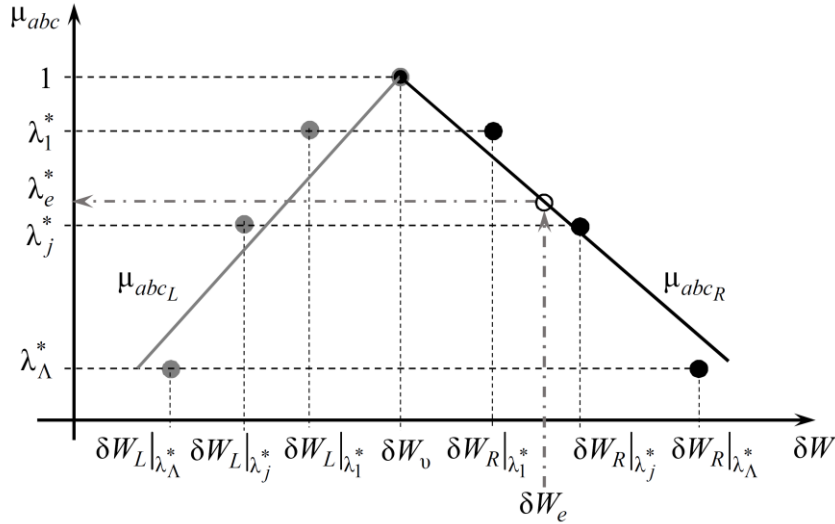


Рис. 4. Апроксимація гілок функцій приналежності μ_{abc}

Тоді під час експлуатації для оцінювання невизначеності вимірювання електроенергії при зниженому струмі через вузол обліку можливо скористатися нечіткою функцією:

$$\widetilde{\delta W}(I_{L1}, I_{L2}, I_{L3}) = \left[\frac{\sum \zeta I_{\zeta} \delta W_{L\zeta}(I_{\zeta})|_{\lambda_b^*}}{\sum \zeta I_{\zeta}}; \frac{\sum \zeta I_{\zeta} \delta W_{R\zeta}(I_{\zeta})|_{\lambda_b^*}}{\sum \zeta I_{\zeta}} \right]. \quad (22)$$

Запропонована математична модель оцінювання невизначеності вимірювання реалізована у вигляді комп'ютерної програми EMRL (рис. 5), яка, на основі поточних показів лічильника, які можуть зчитуватися автоматично, оцінює величину найбільш можливого недообліку електроенергії.

Початок: дата і час		Початок: покази, кВт·год		Кінець: дата і час		Кінець: покази, кВт·год		Тривалість зниженого навантаження		Спожито за показами, кВт·год		Оцінка реального споживання, кВт·год		Найбільш можливий недооблік, кВт·год	
21.04.2024	11:52:31	3,437		21.04.2024	15:40:50	3,466		03:48:19	3,480	4,297	0,817				
22.04.2024	8:37:50	3,466		22.04.2024	12:05:20	3,495		03:27:30	3,480	4,289	0,809				
22.04.2024	12:06:32	3,495		22.04.2024	15:45:10	3,528		03:38:38	3,960	4,518	0,558				
23.04.2024	8:12:07	3,505		23.04.2024	11:39:21	3,563		03:27:14	6,960	7,680	0,720				
23.04.2024	11:40:28	3,563		23.04.2024	15:55:00	3,610		04:14:32	5,640	6,061	0,421				
24.04.2024	9:07:30	3,611		24.04.2024	11:48:53	3,646		02:41:23	4,200	4,382	0,182				
24.04.2024	11:49:00	3,647		24.04.2024	14:00:41	3,677		02:11:41	3,600	3,742	0,142				
25.04.2024	8:12:13	3,678		25.04.2024	12:22:41	3,741		04:10:28	7,560	7,833	0,273				
25.04.2024	12:23:25	3,741		25.04.2024	15:34:47	3,792		03:11:22	6,120	6,331	0,211				
28.04.2024	8:06:56	3,792		28.04.2024	11:50:58	3,854		03:44:02	7,440	7,679	0,239				
28.04.2024	11:52:36	3,855		28.04.2024	15:52:03	3,924		03:59:27	8,280	8,531	0,251				
29.04.2024	8:12:23	3,925		29.04.2024	12:32:02	4,003		04:19:39	9,360	9,645	0,285				
29.04.2024	12:33:46	4,004		29.04.2024	15:49:50	4,065		03:16:04	7,320	7,530	0,210				
30.04.2024	8:16:39	4,065		30.04.2024	12:06:32	4,141		03:49:53	9,120	9,379	0,259				
30.04.2024	12:06:40	4,141		30.04.2024	15:59:46	4,221		03:53:06	9,600	9,872	0,272				
01.05.2024	9:19:57	4,221		01.05.2024	12:14:49	4,287		02:54:52	7,920	8,139	0,219				
01.05.2024	12:16:07	4,288		01.05.2024	14:41:28	4,344		02:25:21	6,720	6,905	0,185				

Рис. 5. Програма EMRL для оцінювання невизначеності вимірювання електроенергії при зниженому струмі через вузол обліку

Висновки

Таким чином, запропонована математична модель, що дозволяє оцінювати невизначеності вимірювання електроенергії при зниженому струмі через вузол обліку. Модель являє собою нечітку функцію, за якою при граничному рівні довіри визначається інтервал, що оцінює відхилення показів лічильника у складі вузла обліку від дійсних значень енергії, які спожиті за період зниженого струму. Модель враховує характеристики вимірювальних трансформаторів струму та вимірювальних каналів лічильника електроенергії, що підвищує точність обліку при несиметричному навантаженні. Запропонована модель реалізована у вигляді комп'ютерної програми, використання якої дає змогу постачальнику електроенергії аналізувати рівень недообліку. На основі цього споживачу можуть бути сформульовані рекомендації щодо модернізації обладнання вузла обліку, зокрема – заміни трансформаторів струму, для приведення їх коефіцієнта трансформації у відповідність до фактичних струмів навантаження та, відповідно, роботи у нормованому діапазоні.

Література

1. Code of commercial accounting of electric energy: approved by resolution of The National Commission for State Regulation of Energy and Public Utilities, Mar. 14, 2018 p. № 311 (as amended on Jan. 10, 2024. № 57). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0311874-18#Text>
2. Concept of implementation of "smart grids" in Ukraine until 2035: Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine № 908-p, Oct. 14, 2022 (as amended on Apr. 28, 2023. № 416). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/908-2022-%D1%80#Text>
3. Smart electricity meter market value worldwide 2020-2027: Statista Research Department, 28.062024. URL: <https://www.statista.com/statistics/1304126/global-smart-electricity-meter-market-value/>.
4. Measurement and accounting of electrical energy using measuring current transformers in conditions of reduced load / Drevetskiy V.V. et al. Research Report. Rivne: NUWM, 2020. 176 p. URL: <https://ep3.nuwm.edu.ua/25021/>.
5. Errors of measurement channels in electricity metering systems / Kalinchyk V.P. et al. *Herald of NTU "KhPI". Series: Problems of improvement of electric machines and devices. Theory and practice.* 2021. № 1(5). P. 58–60. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2021.1.11>.
6. Kaczmarek M., Stano E. Challenges of Accurate Measurement of Distorted Current and Voltage in the Power Grid by Conventional Instrument Transformers. *Energies.* 2023. Vol. 16, 2648. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16062648>.
7. Kaczmarek M. Method of current transformer metrological properties estimation for transformation of distorted currents. *IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC)*, San Diego, CA, USA. 2012. Pp. 724–726. DOI: <https://doi.org/10.1109/IPMHVC.2012.6518847>.
8. A novel dual-core current transformer based on TMR sensor and its measuring characteristics / Zhexuan Zhang et al. *AIP Advances.* 2024. Vol. 14, 035211. DOI: <https://doi.org/10.1063/9.0000652>.
9. Examining performance calibration in smart power system electricity metering based on environmental perception attention LSTM-network / Zhang B. et al. *Frontiers in Energy Research.* 2024. Vol. 12:1405725. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1405725>.
10. Advanced metering infrastructure for low voltage distribution system in smart grid based monitoring applications / Thandava K.S.P. et al. *Sustainable Computing: Informatics and Systems.* 2022. Vol. 35. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2022.100691>.
11. Ballal M.S., Wath M.G., Suryawanshi H.M. Measurement current transformer error compensation by ANN methodology. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series B.* 2020. Vol. 101. Pp. 261–271. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40031-020-00454-9>.
12. Costa M.M. Bidirectional electricity meter metrological evaluation. *25th IMEKO TC4 Symposium and 23rd International Workshop on ADC and DAC Modelling and Testing* (Brescia, Italy, 12–14.09.2022). DOI: <https://doi.org/10.21014/tc4-2022.36>.
13. Vasylets K., Kvasnikov V., Vasylets S. Refinement of the mathematical model of electrical energy measurement uncertainty in reduced load mode. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2022. Vol. 4 (8 (118)). P. 6–16. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.262260>.